

ÇERÇEVELERDE DONATI KOROZYONUNUN TAŞIYICI SİSTEM DAVRANIŞINA ETKİLERİ

Seda Coşkan*, İsa Yüksel

Özet

Türkiye’de yetersiz paspayı, kötü malzeme, yıpratıcı çevresel etkiler vb. nedenlerle donatı korozyonuna uğramış betonarme eleman kesitlerine sıkça rastlanmaktadır. Kesitte donatı çapının azalması, aderans kaybı, beton çatlakları ve donatının mekanik özelliklerinin değişmesi, korozyonun başlıca sonuçlarıdır. Bu sonuçların deprem bölgelerinde yer alan binalarda yapısal davranış üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmalıdır.

Bu çalışmanın amacı, korozyona uğramış betonarme çerçeve sistemli binaların deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemektir. Bu inceleme, başlangıç (sistemde korozyon etkisinin olmadığı) durumundaki yapısal davranış ile korozyon etkisi sonrası yapısal davranış karşılaştırılmak suretiyle yapılacaktır. Bu amaçla, perdesiz düzlem çerçeve sistemler üzerinde korozyonsuz ve çeşitli seviyelerde korozyon etkisinde yapısal çözümlemeler yapılmıştır. Bu çözümlemeler, iki aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada (kesit analizleri), kolon ve kiriş kesitlerinin her farklı korozyon durumu için moment-eğrilik ($M-\kappa$) ve normal kuvvet-eğilme momenti ($N-M$) karşılıklı etkileşim diyagramları çizilmiştir. İkinci aşamada (sistem analizleri) ise her farklı korozyon durumu için çerçeve sistemin itme analizi yapılmıştır. Ardından, gerekli dönüşümlerden sonra, çerçevenin modal kapasite eğrisi elde edilmiş ve hedef deplasman hesaplanmıştır. Ayrıca kesitlerin hasar durumları da incelenmiştir. Çözümleme ve değerlendirmelerde DBYBHY-2007, ATC 40, FEMA 273 gibi ulusal ve uluslararası şartnamelerden faydalanılmıştır. Çözümleme sonuçlarına göre, betonarme elemanı etkileyen donatı korozyonunun türü, şiddeti ve yapı üzerindeki yeri taşıyıcı sistem davranışını olumsuz yönde etkileyen değişkenler olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle mevcut binaların sismik değerlendirilmesi sırasında korozyon etkilerinin çok yönlü olarak göz önüne alınması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çerçeve sistem, Deprem, Donatı, Kapasite, Korozyon.

EFFECTS OF THE REBAR CORROSION TO STRUCTURAL SYSTEM BEHAVIOR OF FRAMES

Abstract

In Turkey, reinforced concrete sections which are suffered corrosion of reinforcement because of inadequate concrete cover, bad material, damaging environmental actions etc. are frequently observed. Reduction in cross-section diameter of reinforcement, loss of bond stress, cracks in concrete, and changes in the mechanical properties of reinforcement are mainly results of corrosion. Negative results of the structural behavior of buildings which have located in earthquake zones should be investigated.

The aim of this study is to examine the behavior of reinforced concrete building frame systems exposed to rebar corrosion and earthquake loads. Structural behavior of sound system (the system without corrosion) will be compared with respect to behavior of corroded system. Nonlinear analyses were performed on the sound frame system and on the frame systems exposed to different level of rebar corrosion. These analyses have occurred in two steps. In the first step (the section analysis), normal force-moment ($N-M$) interaction diagrams and moment-curvature ($M-\kappa$) diagrams of column and beam sections for each different corrosion level are drawn. In the second step (system analysis) static pushover analysis were performed for each different corrosion situation, modal capacity curves were obtained and the target displacement were calculated for each corrosion level. In addition, damages of sections were examined. In analysis, such as ATC-40, FEMA-273, TEC-2007, national and international specifications were benefitted for analysis. According to the results of analysis;

* Bülent Ecevit University, Zonguldak Vocational School, Department of Construction Technology/ZONGULDAK
E-posta: sedacoskan@gmail.com

type, intensity and location of corrosion affect behavior of structural system negatively. During the seismic evaluation of existing buildings, consideration corrosion effects are suggested as versatile.

Key Words: Frame system, Earthquake, Rebar, Capacity, Corrosion.

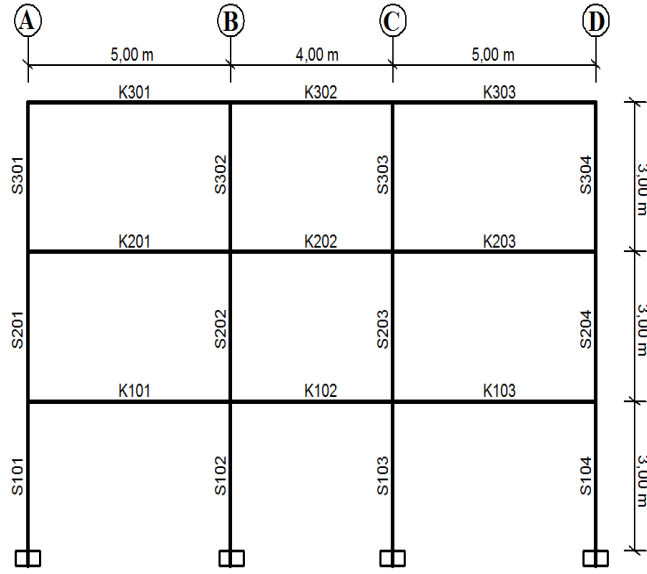
1. Giriş

Korozyon, metal ve çevresi arasında çevresel etkiler sebebiyle meydana gelen elektrokimyasal süreç sonucunda, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişimlerdir. Korozyon elektro-kimyasal bir süreçtir (ACI-222R-01, 2001). Korozyonun başlıca oluşum sebebi, metalin doğada bulunduğu mineral haline dönmek istemesidir (Jones, 1996). Atmosfere açık halde bulunan metallerin tedbir alınmaz ise korozyona uğraması kaçınılmazdır. Betona gömülü halde bulunan donatı çeliğini etrafında bulunan oksit tabakası korumaktadır. Bu oksit tabakası, beton karışımında kullanılan portland çimentosunun hidrate olması sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 in ortamın pH değerini ortalama 12.6 olarak sabitlemesiyle ortaya çıkmaktadır. Donatı pasivasyonunun kırılması; ya klorür iyonlarının difüzyonu ile ya havadaki CO_2 'nin betona difüzyonu sonucunda Ca(OH)_2 ile reaksiyona girip betonun pH değerinin 9'un altına düşmesiyle (karbonasyon), ya da; her iki olayın birlikte meydana gelmesiyle oluşur (Apostolopoulos and Papadakis, 2008). Korozyon, maddi hasarın yanında yapısal davranışı etkileyebilecek ve can kayıplarına dahi neden olabilecek, önemli bir sorundur. Betonarme yapılarda en sık rastlanan korozyon çeşidi karbonatlaşma ile meydana gelen uniform korozyon ve klor etkisiyle oluşan oyuklanma tipi korozyondur. Korozyon sonucunda donatıda çap kaybı meydana gelirken, donatı çeliği ile beton arasında da pas tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka, beton ile donatı arasındaki aderansı zayıflatmaktadır. Ayrıca aderans zayıflamasına ilave olarak donatı mekanik özellikleri de değişebilmektedir (Lee and Cho, 2009).

Bu çalışmanın amacı, korozyona uğramış betonarme çerçeve sistemli binaların deprem etkisi altındaki davranışlarını incelemektir. Bunun için korozyonsuz durum referans kabul edilerek, seçilen 3 katlı 3 açıklıklı bir çerçeve sistemin, çeşitli seviyelerdeki korozyon etkisinde yapısal çözümleri yapılmıştır. Bu çözümler, kesit analizleri ve statik itme analizi olmak üzere iki aşamadan meydana gelmektedir. Çözümleme sonuçları, sistem ve kesit hasarları düzeyinde ele alınmıştır.

2. Model Tanımlama ve Yöntem

Seçilen çerçevede referans durum için malzeme olarak S220 sınıfı çelik ve C16 sınıfı betonun mevcut olduğu kabul edilmiştir. Çerçevenin 25 yaşında, Z2 zemin sınıfında ve birinci derece deprem bölgesinde bulunduğu kabul edilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Çerçevenin genel görünüşü

Çerçevede yapısal düzensizlik mevcut olmayıp, kenar açıklıklar 5'er metre, orta açıklık 4 metre genişliğindedir. Kat yükseklikleri her katta eşit ve 3 metredir. Kolon ve kirişlerin donatıları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kolon ve kirişlerdeki donatı özellikleri

KOLON TİPİ	BENZERİ ELEMANLAR	BOYUT (cm/cm)	BOYUNA DONATI		ETRİYE	PASPAYI (mm)
S 101	S104	40/40	8Ø16		Ø8/200	30
S 102	S103	50/50	10Ø16		Ø8/200	30
K 101	K 102, K 103	25/50	770 mm ²	770 mm ²	Ø8/200	30
			462 mm ²	462 mm ²		

Çerçevede korozyon etkilerini araştırmak için farklı seviye ve yerlerde donatı korozyonu olduğu varsayılmıştır. Bu amaçla çerçevenin ilk hali (referans durum) ile birlikte 5 ayrı korozyon senaryosu göz önüne alınmıştır (Tablo 2). Korozyonun düzeyine bağlı olarak donatı çapı azaltılmış, donatı ve betonun mekanik özelliklerinin değiştiği ve beton-donatı ara yüzeyinde aderans azalma olacağı da göz önüne alınmıştır. Aderans kaybı tüm elemanlarda özel olarak modellenemediğinden beton basınç dayanımına endekslenmiş ve çözümlemelerde beton dayanımı %33 oranında düşürülerek bu kayıp göz önüne alınmaya çalışılmıştır.

Tablo 2. Korozyon senaryoları

Senaryo	Korozyon Oluşum Yeri (Hızı)
Referans	Korozyon yok
Senaryo 1	Tüm kesitlerde (1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Senaryo 2	Tüm kesitlerde (4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Senaryo 3	Yalnız zemin kat kolon ve kirişlerinde (1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Senaryo 4	Yalnız zemin kat kolon ve kirişlerinde (4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Donatı korozyonu nedeniyle çapta meydana gelen kayıplar Denklem 1'den hesaplanmıştır.

$$\Phi(t) = \Phi_0 - 2 P_x = \Phi_0 - 2 i_{\text{corr}} k (t - t_{\text{in}}) \quad (1)$$

Burada;

$\Phi(t)$: t anında donatıda kalan çapı (mm),

Φ_0 : nominal donatı çapı (anma çapı) (mm),

t_{in} : donatı yüzeyinde korozyonun başlama anından itibaren geçen süre(yıl),

P_x : saldırının ortalama işleme değeri(mm),

göstermektedir. Faraday kanunlarına göre P_x işleme değeri donatı çapında kayıpla tanımlanır (Rodriguez and Andrade 2001, Bentur et al.1997). Elektrokimyasal ölçümlerde P_x , Denklem 2’de gösterildiği şekilde bulunur:

$$P_x = k i_{\text{corr}} t_p = k i_{\text{corr}} (t - t_{\text{in}}) \quad (2)$$

Denklem 2’de t_p parametresi korozyon başlangıcı ile ölçümün yapıldığı zaman aralığını (yayıma yılı) vermektedir (Tuutti, 1982). P_x mm/yıl cinsinden, i_{corr} $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve zaman da yıl cinsinden yazılır. k katsayısı ise hızı $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’den, mm/yıl’a çevirmek için kullanılan bir çevirme katsayısıdır ve 0.0116 olarak alınabilir (Tuutti, 1982).

Çözümlemelerde göz önüne alınan diğer bir etki ise donatı mekanik özelliklerindeki değişimdir. Bunun için de ilk önce donatıda meydana gelen kütle kaybını (Δ_w) yüzde cinsinden hesaplamak gerekmektedir (Denklem 3).

$$\Delta_w = ((D_i^2 - D^2)/2) \times 100 \quad (3)$$

Denklem 3’de yer alan D_i ilk çap, D ise Denklem 1 ile hesaplanan korozyon sonrası kalan çaptır. Tablo 3’ de Lee ve Cho’nun yaptığı çalışmaya göre çeliğin akma noktası, çekme dayanımı, uzama oranı ve elastik modülü yeniden hesaplanabilmektedir. Tablo 3’te yer alan; σ_y çeliğin akma dayanımını, σ_{yi} çeliğin başlangıçtaki akma dayanımını, σ_u çeliğin çekme dayanımını, σ_{ui} çeliğin başlangıçtaki çekme dayanımını, E elastik modülü, E_i başlangıçtaki elastik modülü, Δ çelikte uzama oranını, Δ_i başlangıç çeliğinin uzama oranını ifade etmektedir.

Tablo 3. Donatı mekanik özelliklerinin değişimi (Lee and Cho, 2009)

Mekanik Özellikler	Korozyon Tipi	Korozyon sonrası değer
Akma Noktası	Üniform	$\sigma_y = (1 - 1.24(\Delta_w/100)) \cdot \sigma_{yi}$
	Oyuklanma	$\sigma_y = (1 - 1.98(\Delta_w/100)) \cdot \sigma_{yi}$
Çekme Dayanımı	Üniform	$\sigma_u = (1 - 1.07(\Delta_w/100)) \cdot \sigma_{ui}$
	Oyuklanma	$\sigma_u = (1 - 1.57(\Delta_w/100)) \cdot \sigma_{ui}$
Elastik Modül	Üniform	$E = (1 - 0.75(\Delta_w/100)) \cdot E_i$
	Oyuklanma	$E = (1 - 1.15(\Delta_w/100)) \cdot E_i$
Uzama oranı	Üniform	$\Delta = (1 - 1.95(\Delta_w/100)) \cdot \Delta_i$
	Oyuklanma	$\Delta = (1 - 2.59(\Delta_w/100)) \cdot \Delta_i$

Diğer bir önemli etki olan aderans kaybını kesite etki etmek için, korozyonlu kesitlerde beton dayanımı %33 oranında azaltılmıştır.

Bu çalışmada, farklı hız ve konumlardaki korozyonu temsil eden senaryolar için çerçeve sistemin, SAP 2000 programı vasıtasıyla statik itme analizi yapılmıştır. Analizde birinci adım olarak sisteme ölü yükler etki ettirilmiş ve diğer adımlarda ölü

yükler sabit kalmıştır. Çerçeve sistem için hesaplanan deprem yükleri itme analizinde her bir adımda arttırılmak suretiyle yüklenmiştir. Yükleme ters üçgen şeklinde katlara etkiyen eşdeğer yatay yük şeklindedir. Analiz, deprem yüklerinin tamamının yüklenmesi veya yükleme esnasında mekanizma durumu meydana gelmesi olaylarının hangisi erken olursa o zaman sona erdirilmiştir.

Statik itme analizinde sistemin geometrisi, kesit ve malzeme özellikleri ile elastik ötesi davranış gözönüne alınmaktadır. Daha sonra sistem adım adım yüklenirken, sisteme etki eden yatay yükle tepe noktasının yaptığı yerdeğiştirme arasındaki ilişki elde edilmektedir.

Analizde kiriş ve kolon rijitlik azaltmalarını yapmak amacıyla, DBYBHY-2007’de verilen ve Denklem 4, 5 ve 6’da görülen çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitlikleri $(EI)_e$ kullanılmıştır. Kirişler için Denklem 4, kolonlar için Denklem 5 ve Denklem 6 kullanılmıştır.

$$(EI)_e = 0.4(EI)_0 \quad (4)$$

$$N_D / (A_c f_{cm}) \leq 0.10 \rightarrow (EI)_e = 0.40 (EI)_0 \quad (5)$$

$$N_D / (A_c f_{cm}) \geq 0.40 \rightarrow (EI)_e = 0.80 (EI)_0 \quad (6)$$

Burada $(EI)_0$ çatlamamış kesite ait eğilme rijitliğidir. N_D , düşey yükler altında kolonda oluşan eksenel kuvveti, A_c , kolon brüt enkesit alanını, f_{cm} ise ortalama beton dayanımını ifade etmektedir. Buna göre eğilme rijitlikleri, kirişlerde 0.40, kolonlarda ise 0.40-0.80 arasında değerler almıştır. Analizde kolon ve kiriş uçlarında plastik mafsalların oluşabileceği kabulü yapılmıştır. Kiriş ve kolon uçlarında plastik mafsalları boyu, ilgili eleman boyunun %10’u olarak alınmıştır. Plastik mafsalları kabulüne göre, eleman üzerine etkiyen yük arttıkça sistemin rijitliği azalmakta, bazı bölgelerde kapasiteye ulaşıldıktan sonra yük sabitleşmekte ve eleman deformasyon yaparak enerjiyi sönmlemektedir. Bu süreç, eleman deformasyon kapasitesini kaybedene kadar devam etmektedir (Özmen vd. 2007). Statik itme eğrisinin adımları, kesitlerde oluşan plastik mafsalların oluşum sırası ve sistemin davranışının değerlendirilmesi için kılavuz niteliğindedir. Statik itme eğrisinin elde edilmesinden sonra SAP 2000 çıktılarından spektral ivme (S_a) ile spektral yer değiştirme (S_d) eğrisi elde edilmiştir. DBYBHY-2007 kılavuzluğunda zemin sınıfı ve deprem bölgesine göre önceden çizilen elastik istem spektrum eğrisi ile S_a - S_d (modal kapasite) eğrisi kesiştirilmiştir. Buradaki amaç, elasto-plastik yerdeğiştirmeyi (d_1) belirlemektir. Bu kesişim sırasında iki olası durum mevcuttur; $T_1 > T_B$ ise $C_R = 1$ alınır; $T_1 \leq T_B$ ise ardışık yöntemle hesaba geçilmektedir. T_1 sistemin periyodu, T_B spektrum karakteristik periyodu, C_R ise spektral yerdeğiştirme oranıdır. Bu çalışmaya sözkonusu çerçevede $C_R = 1$ olduğundan son adıma geçilerek, iki eğrinin kesişim noktasına karşılık gelen d_1 yardımıyla sistemin hedef deplasmanı (U_{N1}) hesaplanmıştır (Denklem 7).

$$U_{N1} = \phi_{N1} \Gamma_1 d_1 \quad (7)$$

Denklemde yer alan ϕ_{N1} çerçevenin tepesinin birinci moda ait mod şekli genliği, Γ_1 1.moda ait katkı çarpanıdır. Böylece her senaryoya ait hedef deplasman hesaplanmıştır. Bu hesaptan sonra ise artık statik itme analizinin son adıma geçilmiştir. SAP 2000 programında statik itme çözümünde ölüyüklerle ilave olarak oluşturulan ikinci bir itme analizi eklenerek, çerçevenin yapacağı tepe yerdeğiştirmesi hedef deplasman ile sınırlandırılmıştır. Bir başka deyişle çerçeve hedef deplasmana kadar itilmiştir. Elde edilen analizin son adımı sistemin performans noktası hakkında bilgi vermektedir.

Sistemin performansını irdelemek için ilgili kesitlerin moment-dönme ilişkilerine ve plastik mafsalları oluşum yeri ve sırasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla XTRACT bilgisayar

programı kullanılarak moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Elde edilen bu ilişkiler statik itme analizine veri teşkil etmiştir.

DBYBHY-2007’de plastik şekildeğiştirmelerin meydana geldiği betonarme elemanlarda, çeşitli kesit hasar sınırlarına ait şekildeğiştirme üst sınırları tanımlanmıştır. Buna göre Minimum Hasar Sınırı (MN) için kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliğinin birim şekildeğiştirmesine bakılırken, Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ) için etriye içindeki bölgenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesi ile donatı çeliği birim şekildeğiştirmesine bakılmaktadır. Bu değerlerin üst sınırları Tablo 4’te verilmiştir. Tablo 4’te verilen ρ_s ve ρ_{sm} değerleri sırasıyla kesitte bulunan ve kesitte bulunması gereken enine donatı hacimsel oranlarını ifade etmekte bu çalışmada ρ_s / ρ_{sm} oranı 1 olarak alınmıştır.

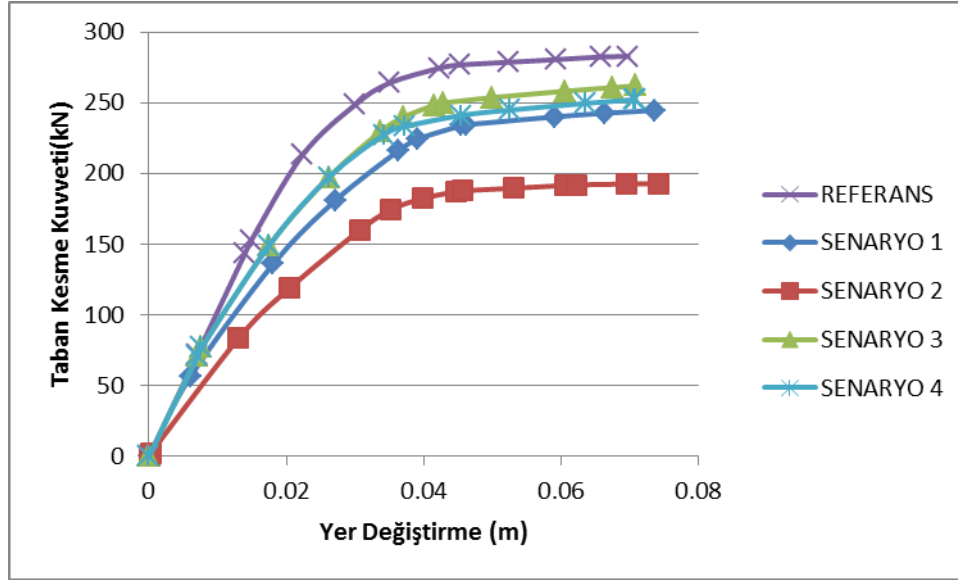
Kesit analizi sırasında eğrilik ile beton ve donatı için birim uzama/kısalma değerleri elde edilmiştir. Her bir plastik mafsallık için, çerçevenin hedef yerdeğiştirmesine karşılık gelen şekil değiştirmeleri Tablo 4’te verilen sınır değerlerle karşılaştırılarak kesitin hasar durumu belirlenmiştir.

Tablo 4. DBYBHY-2007’ye göre hasar sınırları için beton ve donatıda birim uzama değerleri

Şekil Değiştirme Sınırı	Hasar Sınırı	
	Betonda Birim Kısalma(ϵ_c)	Donatıda Birim Kısalma ve Uzama(ϵ_s)
Min. hasar sınırı (MN)	0.0035	0.010
Güvenlik sınırı (GV)	$0.0035 + 0.010 \rho_s / \rho_{sm} \leq 0.0135$	0.040
Göçme sınırı (GÇ)	$0.0040 + 0.014 \rho_s / \rho_{sm} \leq 0.0180$	0.060

3. Sonuçlar ve Tartışma

Sayısal uygulamaya konu çerçevenin farklı korozyon senaryoları için itme analizi sonucunda elde edilen taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirmesi (V- δ) eğrileri Şekil 2’de gösterilmiştir. Buna göre; referans durum beklendiği üzere en iyi senaryodur. Senaryonun özelliğine göre, taban kesme kuvveti düzeyinde önemli düşüşler gözlenmektedir. Özellikle senaryo 2’de (tüm senaryoda $4 \mu A/cm^2$ hızında korozyon varken) taban kesme kuvveti 283 kN’dan 183 kN’a kadar (%35 oranında) düşmektedir. Bu demektir ki, sistem 10 yıl süre ile tüm kesitlerinde söz konusu korozyona maruz kalırsa en iyi ihtimalle taban kesme kuvveti taşıma gücü %35 düşecektir. Korozyonun yalnızca zemin katta olması (senaryo 3 ve 4) durumunda taban kesme kuvvetinde düşüş az olmakla birlikte sistemin yanal ötelenmesi artmaktadır. Senaryo 2’de de benzer şekilde tepe noktası ötelenmesi referans duruma göre daha fazladır. Sistemin daha fazla tepe yerdeğiştirmesi talep etmesi hasarın fazla olması demektir. Bu bakımdan tepe noktası yerdeğiştirmesinin ve kat arası ötelenmelerin hasar kontrolü bakımından sınırlı olması istenir.

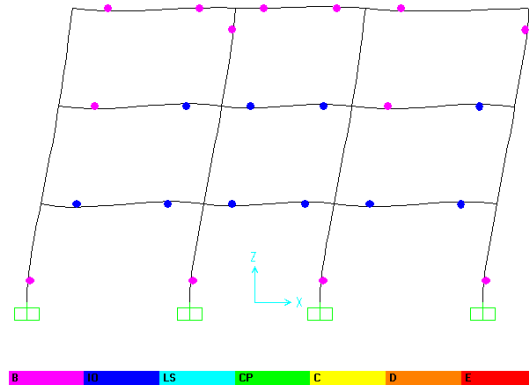


Şekil 2. Tüm senaryolara ait statik itme eğrileri

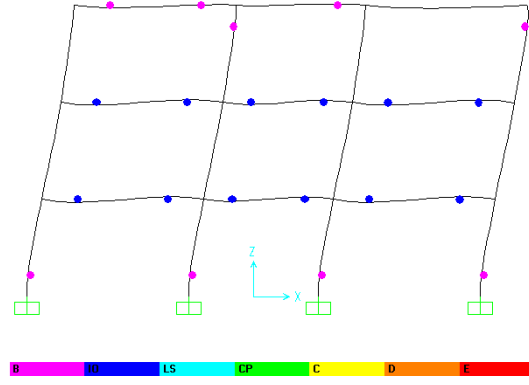
Tablo 5'te çeşitli senaryolar için sistemin performans düzeyi gösterilmiştir. Buna göre, tüm senaryolar Can Güvenliği (CG) düzeyinde çıkmaktadır. Ancak dikkat edilmesi gereken bir husus vardır. Burada CG performans düzeyi DBYBHY-2007 esaslarına göre elde edilmiştir. Sistemde kiriş ve kolon sayısı az olduğundan yüzde olarak bir katta yalnız bir elemanın bile belirgin hasarlı çıkması yönetmelikte verilen sınırların aşılmasına yetebilmektedir. Dolayısıyla değerlendirmenin belirgin ve minimum hasarlı eleman sayıları üzerinden yapılması daha anlamlı olacaktır. Buna göre tüm senaryolarda değişik düzeylerde olmakla birlikte referans duruma kıyasla daha fazla minimum hasarlı düzeyden belirgin hasarlı düzeye geçmiş eleman vardır. Katlar itibarıyla bakıldığında referans senaryoda en kötü durum 1. katta görülürken; senaryo 4'te zemin katta korozyon nedeniyle hasar birikimi olduğu görülmektedir. Senaryo 2'de ise hasar genel itibarıyla referansa göre fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Kesitlerde oluşan hasara göre hesaplanan performans düzeyleri

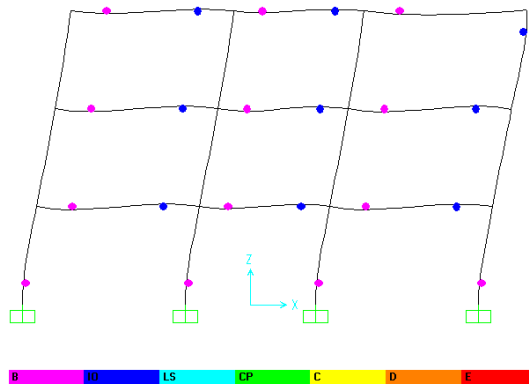
Senaryo	Kat	Minimum Hasarlı Kesit Sayısı	Belirgin Hasarlı Kesit Sayısı	İleri Hasarlı Kesit Sayısı	Göçme Hasarlı Kesit Sayısı	Sonuç
Referans	1	4	3	-	-	CG
	2	-	3	-	-	CG
	3	4	1	-	-	CG
Senaryo 1	1	4	3	-	-	CG
	2	-	3	-	-	CG
	3	4	-	-	-	CG
Senaryo 2	1	4	3	-	-	CG
	2	-	3	-	-	CG
	3	1	4	-	-	CG
Senaryo 3	1	4	1	-	-	CG
	2	-	3	-	-	CG
	3	3	1	-	-	CG
Senaryo 4	1	2	5	-	-	CG
	2	-	3	-	-	CG
	3	3	1	-	-	CG



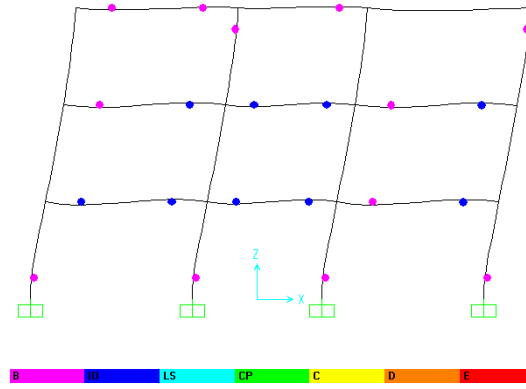
Şekil 3. Referans senaryoya ait plastik mafsal oluşum süreci



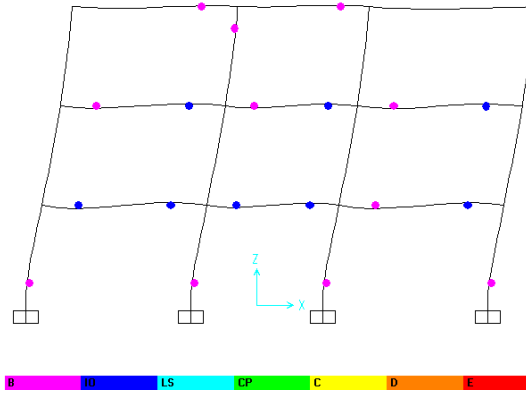
Şekil 4. Senaryo 1'e ait plastik mafsal oluşum süreci



Şekil 5. Senaryo 2'ye ait plastik mafsal oluşum süreci



Şekil 6. Senaryo 3'e ait plastik mafsall oluşum süreci



Şekil 7. Senaryo 4'e ait plastik mafsall oluşum süreci

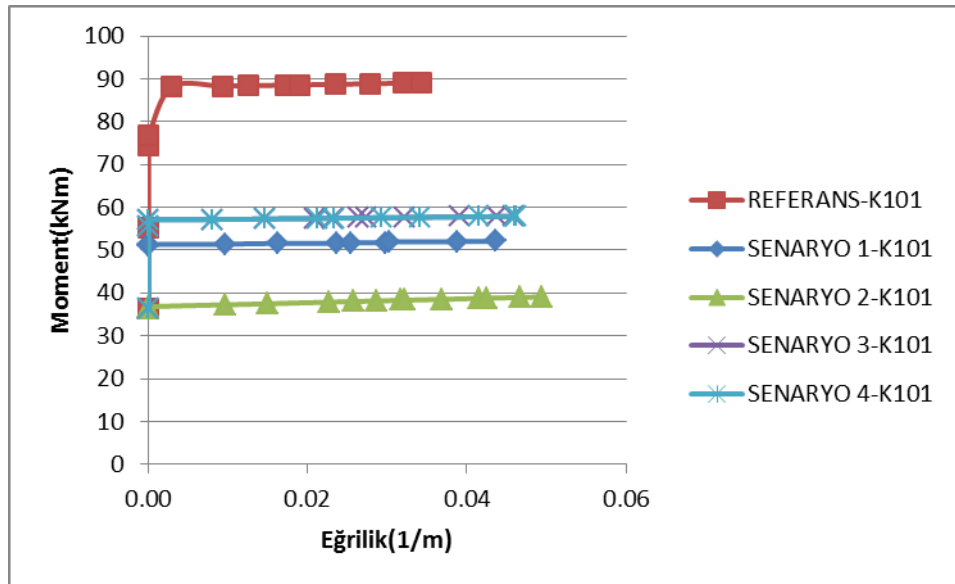
Şekil 3-7'de çerçevenin hedef deplasmana ulaştığı anda (ATC-40 kapasite spektrumu yöntemi esasına göre) mafsallaşma durumu gösterilmiştir. Senaryo 2'deki mafsall durumuna bakıldığında, kirişlerdeki mafsallaşmanın, daha hemen kullanım(IO) seviyesine ilerleyemeden zemin kat kolon uçlarında ve 3. kat kenar kolon üst ucunda bir adet (IO düzeyinde) plastik mafsall oluştuğu görülmektedir. Sistem kirişlerindeki plastik mafsallarda enerji tüketim kapasitesi tamamlanmadan kolonlarda plastik mafsall oluşumu davranış bakımından olumsuz bir sonuçtur.

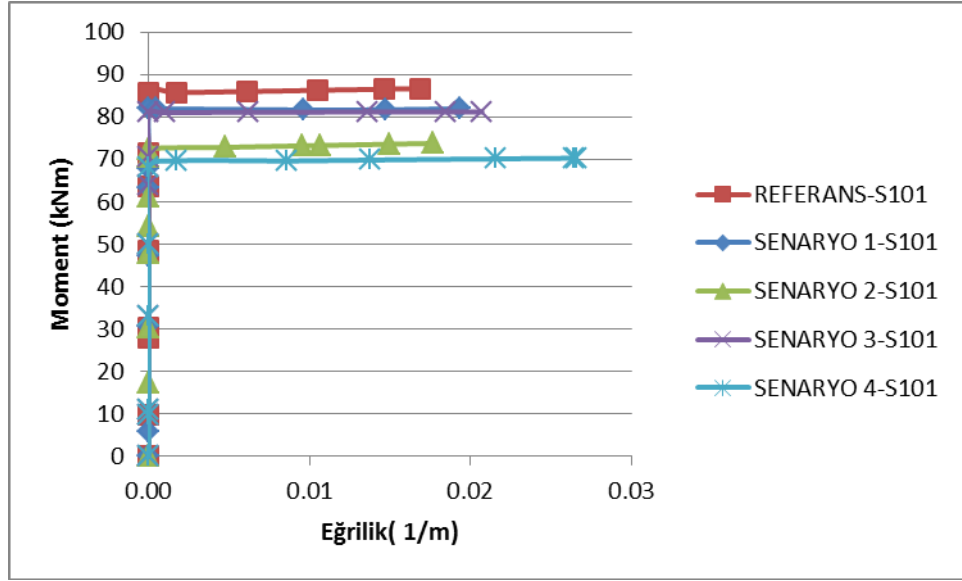
Ardışık iki kat arasındaki yer değiştirme farkını ifade eden azaltılmış görel kat ötelemeleri Tablo 6'da verilmiştir. Buna göre; referans senaryoda azaltılmış görel kat ötelemeleri büyüklük sırasıyla 2-1-3. katta meydana gelirken; en kötü durum olan senaryo 2'de hem sayısal değer itibariyle artış olmakta hem de bu sıralama 2-3-1 şeklinde değişmektedir. Senaryo 3 ve 4'te (yalnız 1. katta korozyon varken) 1. kat azaltılmış görel kat ötelemeleri referans duruma göre artış göstermiştir.

Tablo 6. Senaryolara ait azaltılmış görelî kat ötelemeleri

Kat	1.KAT	2.KAT	3.KAT
KatYük.(mm)	3000	3000	3000
Referans	21.3	27.9	20.4
Senaryo 1	23.1	29.3	21.1
Senaryo 2	21.5	29.1	23.6
Senaryo 3	23.3	28.1	19.3
Senaryo 4	24.5	27.7	18.5

Eleman bazında değerlendirme için K101 kirişi sağ ucu ile S101 kolonun alt ucundaki moment-eğrilik ilişkileri Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir. Buna göre; K101 kirişindeki en büyük plastik moment kapasitesi 74 kNm ile referans senaryoda ortaya çıkarken, en düşük moment kapasitesi de 36 kNm ile senaryo 2’de ortaya çıkmıştır. K101 kirişinde senaryo 2’nin plastik moment kapasitesi senaryo 1’e göre yaklaşık % 35 azalmıştır. K101 kirişinde meydana gelen en küçük eğrilik 0.034 1/m ile referans senaryoda gerçekleşirken, en büyük eğrilik ise 0.049 1/m ile (%44 artışla) senaryo 2’de gerçekleşmiştir. S101 kolonunda en büyük plastik moment 86 kNm ile referans senaryoda meydana gelmiştir. Bu kolonda en küçük plastik moment kapasitesi 70 kNm ile senaryo 4’te gerçekleşmiştir. Senaryo 1 ile senaryo 3’ün moment-eğrilik ilişkileri hemen hemen çakışmıştır. S101 kolonundaki en büyük eğrilik de referansa göre % 53 artış ile 4 nolu senaryoda gerçekleşmiştir. Tüm bu bulgular gösteriyor ki, genel (çerçeveye tümüyle yayılmış) korozyon durumunda zemin kat kolonlarındaki eğrilik talebi belirgin şekilde artmaktadır. Korozyonun lokal (yalnız zemin kat kolon ve kirişlerinde) olması durumu da oldukça kötü bir senaryodur ve kiriş ve kolon uçlarında eğrilik talebi yine artmaktadır.

**Şekil 8.** K101 kirişi sağ uç moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 9. S101 kolonu alt uc moment-eğrilik ilişkisi

4. Sonuç ve Öneriler

Üniform korozyona maruz çerçeve sistemlerin davranış değişikliğini ortaya koymak amacıyla yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Korozyon düzeyi, yeri, cinsi ne olursa olsun referans duruma kıyasla daima olumsuz etki yapmaktadır. Ancak, korozyonun hızı ve yeri çerçevenin taşıyabileceği taban kesme kuvveti ve tepe yer değiştirmesini önemli oranda değiştirmektedir.
- Korozyonun yerel olması ile yaygın olması arasındaki yapısal davranış birbirinden farklıdır.
- Korozyonun sistemde sadece zemin kat kolon ve kirişlerinde olması, yaygın olması durumuna göre kolonlarda eğrilik ve hasar bakımından daha olumsuz sonuçlar vermektedir.
- Korozyonun hızlı ve yaygın olması sistemin mafsallaşma sırasını değiştirebilmektedir. Kirişler tamamen mafsallaşamadan kolonlarda mafsallar meydana gelebilmektedir.
- Korozyonu etkileyen ana faktörler; donatı ile beton arasındaki aderansın kaybolması, donatıda enkesit azalması ve beton ile çelik mekanik özelliklerinin bozulmasıdır.
- Betonarme proje hazırlık aşamasında binanın deprem bölgesi ve korozyon oluşumuna neden olabilecek çevresel faktörler irdelenerek, hesaplara korozyon etkisi dahil edilmelidir. Servis ömrünün belirli dönemlerinde, yapının muhtemel korozyon hasarları ve bunların sonuçları irdelenmelidir.
- Betonarme için aderans, davranışı yönlendiren çok önemli bir unsurdur. kuvveti çok önemlidir. Dolayısıyla korozyonun aderans üzerindeki etkisini ortaya çıkaracak daha detaylı çalışmalar yapılmalı, modeller geliştirilmelidir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, birinci yazarın yüksek lisans tez çalışması kapsamında Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2010 – 45 – 06 – 01 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden ötürü BEÜ Rektörlüğü'ne teşekkür ederler.

6. Kaynaklar

- ACI-222R-01 (2001). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. American Concrete Institute, Detroit.
- Apostolopoulos, C. A., Papadakis, V. G. (2008). Consequences of Steel Corrosion on the Ductility Properties of Reinforcement Bar. Construction and Building Materials, 22, 2316–2324.
- Bentur, A., Diamond, S., Berke, N. S. (1997). Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice. E&FN Spon, London, UK.
- CSI SAP 2000 V-14, (2009). Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual Computer and Structures Inc., Berkeley, California.
- DBYBHY-07, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara, Türkiye.
- Jones, D. (1996). Principles and Prevention of Corrosion, 2nd Ed., Simon&Schuster/A Viacom Company, New Jersey.
- Lee, H.S., Cho, Y.S. (2009). Evaluation of the Mechanical Properties of Steel Reinforcement Embedded in Concrete Specimen as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion, Springer Science, 81–88.
- Özmen, H., İnel, M. ve Bilgin, H. (2007). Betonarme Elemanların Doğrusal Ötesi Davranışlarının Modellenmesi. 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 207-216, İstanbul.
- Rodriguez, J., Andrade, C. (2001). Contecvet - a Validated Users Manual For Assessing the Residual Service Life of Concrete Structures. Geocisa, Madrid, Spain.
- Tuutti, K. (1982). Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- XTRACT, (2007). Cross-Sectional Structural Analysis of Components, TRC Companies, Inc., USA.